

# 独头巷道空气年龄及通风有效性评价研究

王海桥, 田峰, 黄俊歆, 陈涛

(湖南科技大学能源与安全工程学院, 湖南湘潭 411201)

[摘要] 根据独头巷道作业空间的特点, 给出了独头巷道局部空气年龄、平均空气年龄的定义及其计算模型, 用示踪气体测定平均空气年龄的方法和原理, 并用 CFD (computational fluid dynamics) 对独头巷道附壁受限射流通风流场及平均空气年龄进行了数值计算, 得出了独头巷道空间通风流场和平均空气年龄分布, 建立了计算换气效率和排污效率的数学模型。研究表明影响通风有效性的主要因素是空气年龄和污染物浓度, 而影响空气年龄主要是通风气流组织和通风量。为评价独头巷道通风有效性提供了一种新的理论依据。

[关键词] 独头巷道; 平均空气年龄; 通风有效性; 换气效率; 排污效率

[中图分类号] TD72 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)11-0043-05

独头巷道通风是为了稀释和排出掘进过程中煤(岩)体涌出的有害气体和粉尘以及保持良好的空气条件。目前, 独头巷道的通风量通常是分别根据有害气体涌出量、炸药量、工作人员数量计算, 并按风速进行验算, 然后取其最大值<sup>[1]</sup>。而对于评价独头巷道通风质量好坏没有一个评价指标。要保证作业空间良好的空气品质, 这就涉及通风有效性问题。有效通风是指保证独头巷道作业空间环境安全及健康的通风, 评价有效通风的指标主要有换气效率、排污效率。因此, 研究独头巷道通风流场及空气年龄、换气效率、排污效率及其相关性, 为评价独头巷道通风有效性提供了一种新的理论依据。

## 1 独头巷道空气年龄及其计算

### 1.1 空气质点的空气年龄(简称空气年龄) $t$

空气质点的空气年龄是指空气质点自进入独头巷道作业空间起至到达作业空间某点所途经的时间<sup>[2]</sup>。因此空气年龄是空气质点与作业空间点的双重函数。

### 1.2 局部平均空气年龄 $\bar{\tau}_i$

局部平均空气年龄是同时到达某空间微小区域

$P$ (简称某空间点)的所有空气年龄的平均值。同时到达某空间点的所有空气年龄各不相同, 有长有短, 不同空气年龄的空气质点所占的份数符合一个分布  $A_p(t)$ ,  $\int_0^{\infty} A_p(t) dt = 1$ 。对于给定的气流组织, 这一分布是空间点的单值函数。局部平均空气年龄  $\bar{\tau}_i$  就是该点各空气质点的空气年龄  $t$  以  $A_p(t)$  为权的加权平均值, 即

$$\bar{\tau}_i = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot A_p(t) dt}{\int_0^{\infty} A_p(t) dt} = \int_0^{\infty} t \cdot A_p(t) dt \quad (1)$$

空气质点在独头巷道作业空间运动的过程中会不断吸收污染物, 新鲜程度下降。因此局部平均空气年龄短的点, 空气吸收污染物的机会少些, 比较新鲜, 换气能力就好。假定独头巷道采用压入式通风方式, 并且假定风筒出口口的风流是新鲜的, 则空气刚进入独头巷道空间时, 空气年龄为零。

局部平均空气年龄的测量可采用以示踪气体为媒介的间接测量方法, 即通过测某空间点的示踪气体浓度, 经计算得到局部平均空气年龄(见图1)。在送风风筒内送示踪气体, 并使之在到达风筒出口口之前得以充分混合。从0时刻开始送入独头巷道

[收稿日期] 2006-02-22; 修回日期 2007-09-28

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59974022, 50474062)

[作者简介] 王海桥(1962-), 男, 湖北武汉市人, 湖南科技大学教授, E-mail: hqwang1962@sina.com

作业空间内,作业空间浓度会逐渐升高,并最终达到平衡。在要考察的区域均匀布置测点,连续或间断采样该点浓度,可计算出局部平均空气年龄。

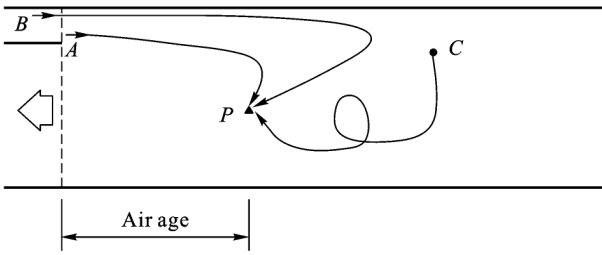


图1 示踪气体浓度与空气年龄关系  
Fig.1 Connection of concentration of tracer gas and air age

假定风筒送入的空气质点中的示踪气体在质点运动中不扩散,即空气质点中示踪气体浓度始终等于送风浓度  $C_s$ ,此外 0 时刻作业空间内示踪气体浓度为 0。

如图 1,  $\tau=0$  时, A 质点恰好在风筒出风口处; B 质点在 A 质点上游任一点处,从 B 质点的位置运动到 A 质点的位置所需时间为  $\Delta T_1$ ; C 质点在独头巷道作业空间内任意一点处,  $\tau=0$  时,其空气年龄为  $\Delta T_2$ 。在时刻  $T$  三质点正好同时到达空间点 P,此时 A 的空气年龄  $t_{AP} = T$ , B 的空气年龄  $t_{BP} = T - \Delta T_1$ ; C 的空气年龄  $t_{CP} = T + \Delta T_2$ 。如 P 点的空气年龄分布函数为  $A_p(\tau)$ ,则 A 质点所占质量份数为  $A_p(T)$ , B 质点所占质量份数为  $A_p(T - \Delta T_1)$ , C 质点所占质量份数为  $A_p(T + \Delta T_2)$ 。可见在  $T$  时刻,空气年龄  $\leq T$  的空气质点在  $\tau=0$  时都在风筒内,即其浓度都为  $C_s$ ;而空气年龄  $> T$  的在  $\tau=0$  时都在独头巷道作业空间内,因此浓度为 0。所以  $T$  时刻到达 P 点的各空气质点所含的示踪气体浓度  $C_{Pi}(t)$  与空气质点的空气年龄  $t$  有关,可表达为

$$C_{Pi}(t) = \begin{cases} C_s & 0 \leq t \leq T \\ 0 & t > T \end{cases} \quad (2)$$

所以  $T$  时刻 P 点的示踪气体浓度

$$C_p(T) = \int_0^{\infty} C_{Pi}(t) \cdot A_p(t) dt = \int_0^T C_s \cdot A_p(t) dt + \int_T^{\infty} 0 \cdot A_p(t) dt = \int_0^T C_s \cdot A_p(t) dt \quad (3)$$

$$\text{因为 } A_p(t) = C'_p(t)/C_s \quad (4)$$

所以式(1)可变为

$$\bar{\tau}_i = \int_0^{\infty} t \cdot A_p(t) dt =$$

$$\int_0^{\infty} t \cdot (C'_p(t)/C_s) dt = \int_0^{\infty} (1 - C_p(t)/C_s) dt \quad (5)$$

式(5)即为局部平均空气年龄与示踪气体浓度的关系。

### 1.3 作业空间平均空气年龄 $\bar{\tau}$

作业空间平均空气年龄就是整个作业空间各点的局部空气年龄的平均值,即

$$\begin{aligned} \bar{\tau} &= \left(\frac{1}{V}\right) \int_V \bar{\tau}_i \cdot dV = \left(\frac{1}{V}\right) \int_V \int_0^{\infty} t \cdot A_p(t) dt dV \\ &= \left(\frac{1}{V}\right) \int_0^{\infty} t \int_V A_p(t) dV dt = \left(\frac{1}{V}\right) \int_0^{\infty} t \cdot [A_p(t)] dt \\ &= \frac{L}{V} \int_0^{\infty} t \cdot \left(1 - \frac{C_c(t)}{C_s}\right) dt \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $C_c(t)$  为  $t$  时刻 P 点示踪气体浓度;  $V$  为作业空间体积( $\text{m}^3$ );  $L$  为送风量(单位时间换气量  $\text{m}^3/\text{min}$ )。

根据文献[3],置换作业空间全部现存空气的时间  $\tau_\gamma$ (即换气时间)是作业空间平均空气年龄的 2 倍,即

$$\tau_\gamma = 2\bar{\tau} \quad (7)$$

空气通过作业空间最短时间是作业空间体积  $V$  与单位时间换气量  $L$  之比,即换气次数的倒数,定义为名义时间常数  $\tau_n$ :

$$\tau_n = V/L = 1/n \quad (8)$$

式中  $n$  为换气次数( $\text{s}^{-1}$ )。

平均空气年龄测量和计算比较复杂,可采用数值模拟方法进行模拟。

## 2 独头巷道平均空气年龄数值模拟

### 2.1 数学物理模型

独头巷道一般采用局部通风机进行射流通风,压入式通风的风筒一般布置在独头巷道的侧壁,风筒出口的位置在巷道侧壁的中部,与独头巷道端头保证一定的安全距离,因此,根据独头巷道通风实际情况,将独头巷道简化为宽  $\times$  高  $\times$  长 =  $X \times Y \times Z = 10 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  的三维巷道空间,压入式风筒出口距独头巷道迎头的距离为 10 m,风筒出风口直径  $\Phi = 600 \text{ mm}$ 。模型计算域为风筒出口到独头巷道迎头,如图 2。

假定:**a.** 通风气流可视为不可压缩流体,可忽略由流体粘性力做功所引起的耗散热,同时假定壁面绝热,等温通风;**b.** 假定流场具有高紊流 Reynolds 数,这时流体的紊流粘性具有各向同性,紊流粘性系数  $\mu$  可作为标量处理;**c.** 流动为稳态紊流,满足 Boussinesq 假设。

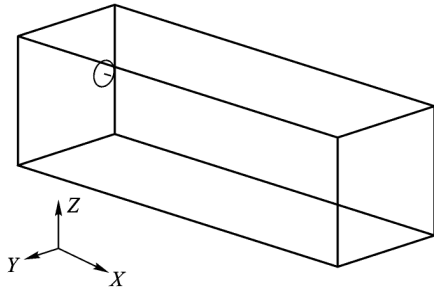


图2 独头巷道贴附射流通风物理模型

Fig. 2 Physical model of restricted wall-attached jet ventilation for heading face

因此,独头巷道通风可用  $k-\varepsilon$  紊流流动的基本微分时均控制方程描述,通用的微分方程为<sup>[2]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ U_i \varphi - \frac{\Gamma_\varphi}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right] = S_\varphi$$

上式中,  $\varphi$  为模型通用因变量,可代表速度、紊流动能、紊流动能耗散率等;  $\Gamma_\varphi$  为与  $\varphi$  对应的扩散系数;  $S_\varphi$  为与  $\varphi$  对应的源项。其具体含义见文献[4]。

## 2.2 边界条件及数值计算

根据计算模型的实体条件,以压入式送风风筒出口为模型的入口边界;以送风风筒出口处的巷道断面为出口边界,巷道壁面及迎头为固定边界。设风筒出口风速为 10 m/s,则模型的边界条件可描述为:

入口边界:  $U_z = U_y = 0, U_x = 10$  m/s, 紊流动能  $k_{in} = C \times U_x^2 / 2$ , 紊流动能耗散率  $\varepsilon_{in} = C_\mu \rho k^2 / \mu$ , 根据文献[5],  $C$  通常取 0.005% ~ 0.015% ;

出口边界:取风筒入口处的巷道截面为出口边界,  $\partial U_i / \partial x_i = 0, P = P_{out}$ , 取相对压力  $P = 0, k, \varepsilon$  自由滑动;

壁面边界:所有壁面上施加无滑移边界条件,即  $U_i = 0$ , 壁面绝热;壁面粗糙度取 0.03 m, 垂直于壁面的压力梯度为 0。

根据计算模型和边界条件,将三维计算域共划分 22 062 个网格,24 738 个节点,用 FLUENT 数值模拟软件计算的结果见图 3 至图 6。

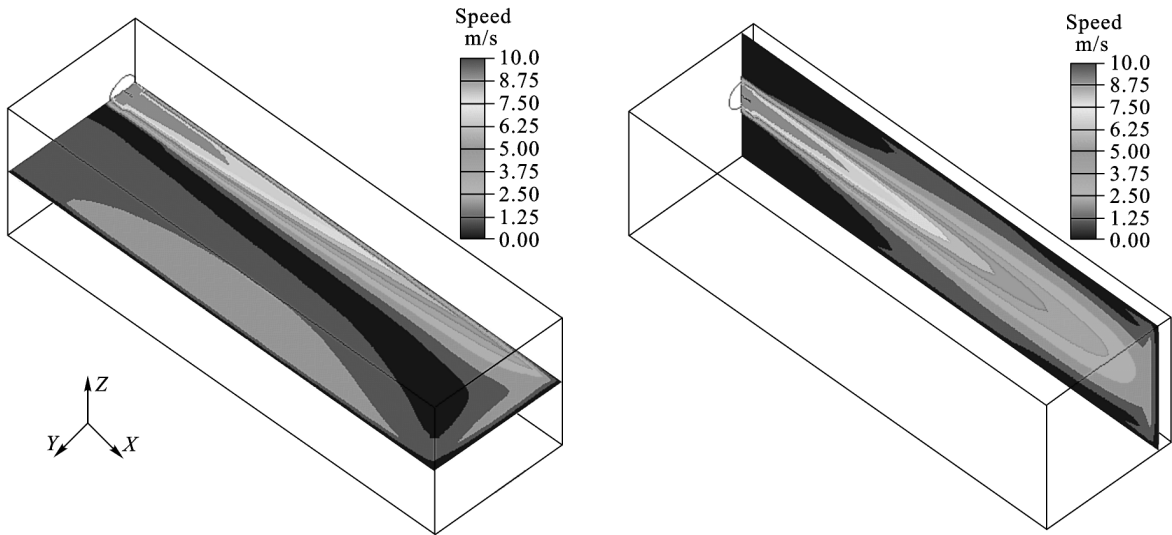


图3 射流中心所在 X-Y 和 X-Z 平面速度分布

Fig. 3 Velocity field of jet center on X-Y & X-Z plane

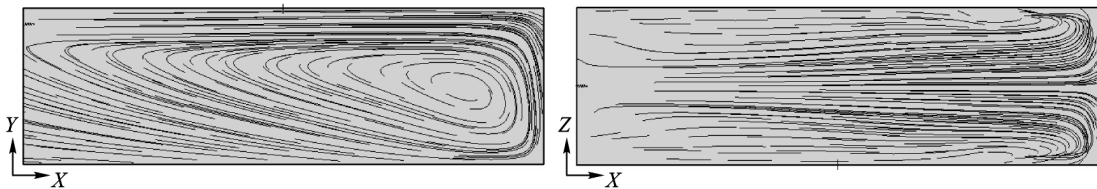


图4 射流中心所在 X-Y 和 X-Z 平面空气流动流线

Fig. 4 Air flow streamline of jet center on X-Y & X-Z plane

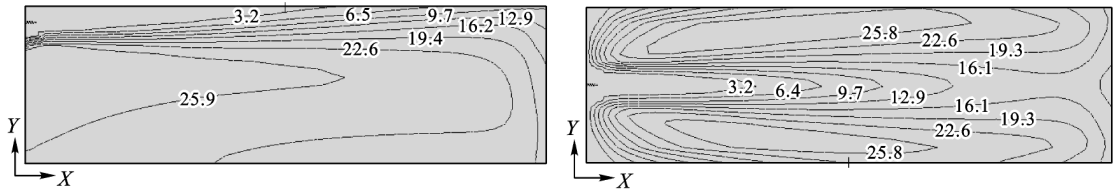
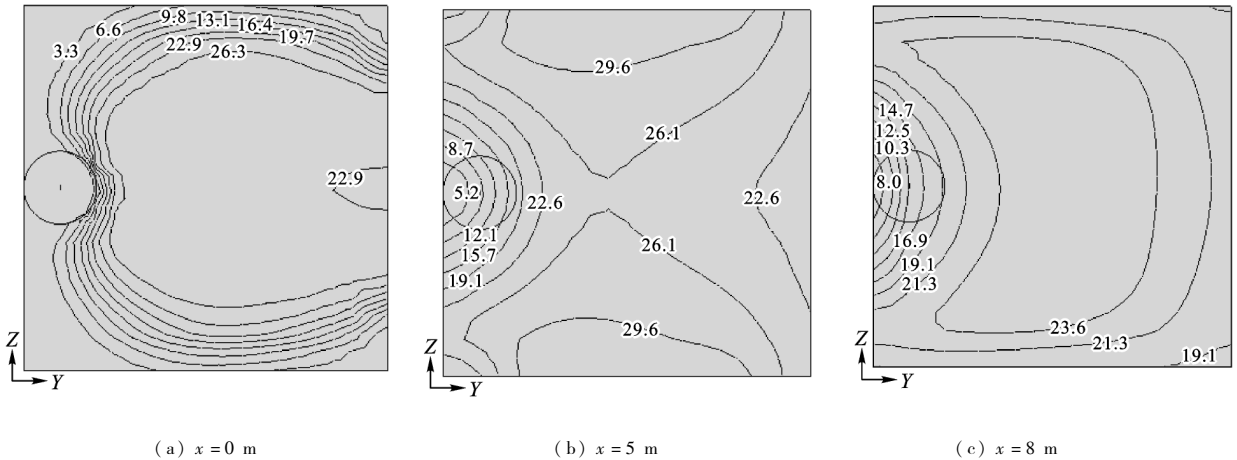


图5 射流中心所在 X-Y 和 X-Z 平面平均空气年龄分布(单位:s)

Fig. 5 Average air age distribution of jet center on X-Y & X-Z plane



(a) x = 0 m

(b) x = 5 m

(c) x = 8 m

图6 射流中心所在 Y-Z 平面平均空气年龄分布(单位:s)

Fig. 6 Average air age distribution of jet center on Y-Z plane

### 2.3 计算结果分析

图3是射流主截面的流场速度分布;图4是射流主截面的流线,由于是附壁受限射流,因此在主截面上有回流和涡流,同时射流在前段有明显的卷吸现象,与射流理论是一致的。图5和图6是数值计算的平均空气年龄分布;在图5中,射流的主截面上,平均空气年龄小,较大的平均空气年龄出现在回流段和涡流区。图6是Y-Z平面不同截面的平均空气年龄分布,在风筒出口处(x=0 m),风筒侧的平均空气年龄小,回流侧的平均空气年龄大;距离出风口的距离不同,其平均空气年龄分布也不同。整个计算区域计算的最大平均空气年龄为29.6 s,在风流入口,空气年龄为0,在射流的主截面上,平均空气年龄逐渐增大;有涡流区的地方平均空气年龄就大,说明平均空气年龄与通风流场是密切相关的。

## 3 换气效率和排污效率

### 3.1 换气效率

换气效率是衡量换气效果优劣的一个指标,是气流自身的特性参数,与污染物无关<sup>[5]</sup>。考察点换气效果的优劣取决于该点的局部平均空气年龄。因此换气效率 $\eta_a$ 可定义为理论上最短的换气时间 $\tau_n$ 与实际换气时间 $\tau_y$ 之比:

$$\eta_a = \tau_n / \tau_y = \tau_n / 2\bar{\tau} \quad (9)$$

根据前面的数值计算,三维计算域内的24738个节点计算结果中,最大平均空气年龄29.6 s,最小平均空气年龄0 s,平均空气年龄为20.57 s,即 $\bar{\tau} = 20.57$  s;三维计算域体积90 m<sup>3</sup>,风量2.827 m<sup>3</sup>/s,根据式(8),则 $\tau_n = V/L = 31.83$  s,所以,根据式(9), $\eta_a = \tau_n / 2\bar{\tau} = 31.83 / (2 \times 20.57) = 0.7737 = 77.37\%$ 。根据文献[6],一般压入式射流通风,当换气效率在50%以上时均有较好的换气效果。

### 3.2 排污效率

排污效率是反映通风对污染物排除能力的指标。对相同的污染物发生量与送风量,能维持较低的稳态作业空间浓度,或较快地把作业空间的原始浓度降下来的气流组织,其排污效率就高。排污效率除了与通风风流流场有关即与换气效率有关外,还与污染物的特点(如污染物的位置、污染物的密度等)有关。因此,排污效率E可定义为移出作业空间污染物的迅速程度。即

$$E = C_p / C \quad (10)$$

式中 $C_p$ 为独头巷道作业空间回风流污染物浓度;

$C$ 为作业空间平均污染物浓度。

式(10)是以送风风流污染物浓度 $C_0 = 0$ 为条件,若 $C_0 \neq 0$ ,如可控循环通风情况下,则

$$E = \frac{C_p - C_0}{C - C_0} \quad (11)$$

排污效率也可用空气年龄和污染气流排出时间来表示,根据质量守恒原理可以列出下面等式:

$$C \cdot V = \bar{\tau}_p^c \cdot V_c \quad (12)$$

式中  $\bar{\tau}_p^c$  为污染气流排出时间(周转时间);

$V_c$  为单位时间污染物发生量。

用换气量除式(12),并代入  $V_c/L = C_p$  的关系,可得:

$$E = C_p/C = \tau_n/\bar{\tau}_p^c \quad (13)$$

## 4 结论

1) 空气年龄是指空气质点自进入独头巷道作业空间起至到达作业空间某点所途经的时间,同时也反映了空气品质好坏,因为空气质点在作业空间运动的过程中会不断吸收污染物,新鲜程度下降。

2) 独头巷道作业空间空气年龄与风流流场密切相关,由于独头巷道是附壁受限射流,在有回流和涡流的地方,空气年龄大。

3) 独头巷道作业空间通风有效性可用换气效率和排污效率来评价,换气效率和排污效率除了与

流场和污染物浓度外,均和平均空气年龄有关。对于独头巷道空间某一局部来说,空气年龄越小,空气越新鲜,通风有效性也越好。

4) 空气年龄反映了空气的新鲜程度,平均空气年龄可用示踪气体为媒介测量和计算,也可用 CFD 数值模拟方法进行模拟。

## 参考文献

- [1] 赵以惠主编. 矿井通风与空气调节[M]. 江苏: 中国矿业大学出版社, 1990
- [2] 王海桥. 矿井风流年龄与矿井空气品质分析[J]. 中国安全科学学报, 1998, 8(5): 24 ~ 27
- [3] Mats Sandburg. What's ventilation efficiency[J]. Building and Environment, 1981, 16(2): 123 ~ 135
- [4] 王海桥, 刘荣华, 陈世强. 独头巷道受限贴附射流流场特征模拟实验研究[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 45 ~ 49
- [5] Wang Haiqiao. Experimental simulation and application research of plane Jet Isolating dust theory[A]. Progress in Safety Science and Technology Vol. IV [C]. Beijing/New York: Science Publisher, 1367 ~ 1372
- [6] 马仁民. 置换通风的通风效率及其微热环境评价[J]. 暖通空调, 1997, 27(4): 1 ~ 6

# Study on Air Age and Evaluation of Ventilation Validity of Heading Face

Wang Haiqiao, Tian Feng, Huang Junxin, Chen Tao

(School of Energy & Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

**[Abstract]** Heading face is a special underground workspace, generally forced ventilation is chose to supply fresh air, and the air movements in it belong to restricted wall-attached jet. According to the characteristics of workspace in heading face, this paper gives the definition of partial air age and average air age, and their models for calculating. Tracer gas method was used to menstruate the average air age, and numerical simulation has been used to calculate the ventilation airfield of restricted wall-attached jet and average air age of heading face, and elicit ventilation flow field and distributing of average air age of heading face. Based on them, relations between the air age and ventilation flow field, ventilation validity are analyzed, and the mathematical model of air exchange efficiency and ventilation efficiency of heading face were set up. The study revealed that the major influences to air age are air-flow organization and blast volume, and to air quality are air age and pollutant concentration. The conclusion of this research provides a kind of new theory basis for appraising the ventilation validity of heading face.

**[Keywords]** heading face; average air age; ventilation validity; air exchange efficiency; ventilation efficiency